配方奶粉中添加益生元对SD大鼠生长性能、血液生化指标和养分表观消化率的影响

周水岳[1]　杭远欣[2]　张岩春[3]　戴智勇[3]　潘丽娜[3]　王建武[2*]　方热军[1*]

（1.湖南农业大学动物科学技术学院，长沙 410128；2.中南大学湘雅公共卫生学院，长沙 410128；3.澳优乳业（中国）有限公司，长沙 410005）

摘　要：本试验旨在研究配方奶粉中添加益生元对SD大鼠生长性能、血液生化指标和养分表观消化率的影响。试验选择体重相近的15日龄（断奶前1周）健康SD大鼠48只，适应3 d后将其随机分成3组，分别为A组、B组和C组，每组16只，其中A组为对照组，饲喂普通配方奶粉，B组和C组为试验组，分别饲喂添加低聚糖益生元或多糖益生元的配方奶粉，饲养期为28 d。结果表明：1）与对照组相比，B组和C组SD大鼠的平均日增重分别提高了3.55%和8.33%，料重比分别降低了9.80%和13.06%，但差异均不显著（$P>0.05$）。2）与对照组相比，B组SD大鼠血清高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）含量显著提高（$P\leq0.05$），血清尿素氮（UN）含量显著降低（$P\leq0.05$）；C组SD大鼠血清胰岛素(Ins)、类胰岛素样生长因子-Ⅰ（IGF-Ⅰ）和HDL-C含量显著提高（$P\leq0.05$）。3）与对照组相比，B组SD大鼠血浆非必需氨基酸中精氨酸（Arg）、丝氨酸（Ser）和丙氨酸（Ala）含量均显著提高（$P\leq0.05$）；C组SD大鼠血浆非必需氨基酸中Arg、Ser、甘氨酸（Gly）、Ala和酪氨酸（Tyr）含量均显著提高（$P\leq0.05$）。4）与对照组相比，B组粗蛋白质和粗脂肪表观消化率分别提高了2.42%和5.57%，但均无差异显著（$P>0.05$）；C组粗蛋白质和粗脂肪表观消化率分别提高了7.39%和8.20%，差异显著（$P\leq0.05$）。由此得出，本试验条件下，在配方奶粉中添加低聚糖益生元或多糖益生元均可以改善SD大鼠的血液生化指标，提高其养分表观消化率，从而在一定程度上促进SD大鼠的生长，且以添加多糖类益生元的效果更佳。

关键词：配方奶粉；益生元；生长性能；血液生化指标；养分表观消化率

中图分类号：S816　　　　文献标识码：A　　　　文章编号：

收稿日期：2018-05-09
基金项目：澳优配方奶粉动物喂养实验研究——中南大学（H201610130690001）
作者简介：周水岳（1990—）男，湖南岳阳人，硕士研究生，从事动物营养与饲料科学研究。E-mail： 252714921@qq.com
*通信作者：王建武，副教授，硕士生导师，E-mail： jianwu_wang@csu.edu.cn；方热军，教授，博士生导师，E-mail： fangrj63@126.com

母乳作为哺乳动物出生后最重要的食物来源，含有丰富的蛋白质、脂肪、碳水化合物和生物活性物质，为婴儿的健康成长和发育提供了充足的能量和营养[1]。益生元作为母乳中第三大活性营养成分，事实上在奶粉中是缺乏的[2]。研究发现，母乳喂养的婴儿肠道微生物区系异于普通配方奶粉喂养的婴儿。母乳中含有丰富的益生元和少量益生菌，如果在普通配方奶粉中添加益生元可以提高其营养价值[3]。益生元是在动物消化道内不能被动物自身分泌的消化酶降解，但可以选择性地刺激肠道有益菌生长的一类物质，包括低聚糖、多糖、多元醇、植物提取物、蛋白质水解物等[4-5]，其中聚葡萄糖作为一种多糖就具有益生元的作用[2]。目前，广泛应用于人类食品的益生元包括乳果糖、低聚半乳糖、果寡糖、菊粉及其水解物、低聚麦芽糖和抗性淀粉等[6]。有研究表明，临床试验中菊糖型果寡糖和低聚半乳糖对人体消化和免疫健康均有良好的效果[7]；低聚半乳糖和聚葡萄糖协作可以提高猪和 SD 大鼠养分吸收和可能通过非体液调控机制提高记忆力[8-9]；聚葡萄糖还有影响养分吸收、免疫调节和肠道功能等作用[10]。

2011 年，欧洲婴儿肠胃营养学会通过科学数据证实，在配方奶粉中添加益生元对健康婴儿一般不会引起安全和生长方面的副作用[11-12]，但是，目前研究者们对配方奶粉中添加益生元的安全性和功效还没达成共识[13]。因此，对添加益生元配方奶粉的安全性和功效的研究也成为了从事营养研究的学者的一项责任重大的工作。本试验旨在研究配方奶粉中分别添加低聚糖类益生元和多糖类益生元对 SD 大鼠生长性能、血液生化指标和养分表观消化率的影响，为配方奶粉进一步模拟母乳和更好地适应中国婴儿健康生长和发育的营养需要提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

配方奶粉：普通配方奶粉、添加低聚糖类益生元配方奶粉、添加多糖类益生元配方奶粉，均由澳优乳业(中国)有限公司提供。其中，添加低聚糖类益生元配方奶粉中低聚糖含量为 2.13%（低聚果糖含量为 1.85%，低聚半乳糖含量为 0.28%），添加多糖类益生元配方奶粉中聚葡萄糖含量为 2.20%。

奶液：奶液 1 是由普通配方奶粉与水按 1:3 的比例调制而成；奶液 2 是由添加低聚糖类益生元配方奶粉与水按 1:3 的比例调制而成；奶液 3 是由添加多糖类益生元配方奶粉与水按 1:3 的比例调制而成，现喂现配。

饲粮：饲粮 1 是由玉米、麦麸和普通配方奶粉按 7:2:1 的比例配制而成；饲粮 2 是由玉米、麦麸和添加低聚糖类益生元配方奶粉按 7:2:1 的比例配制而成；饲粮 3 是由玉米、麦麸和添加多糖类益生元配方奶粉按 7:2:1 的比例配制而成。上述饲粮均由湖南某实验动物有限公司生产。

1.2 试验动物及分组

试验动物为 48 只无特定病原体（SPF）级 SD 大鼠，15 日龄（断奶前 1 周），平均体重（29.39±1.89） g，由长沙市天勤生物技术有限公司提供，生产许可证号 SCXK（湘）2014－0011。试验用 SD 大鼠饲养于中南大学 SPF 级动物实验室，温度为 20~26 ℃，相对湿度为 40%~70%，12 h 光照、12 h 黑暗。

适应性喂养 3 d 后，SD 大鼠按体重随机分为 3 组，分别为对照组（A 组）、低聚糖类试验组（B 组）和多糖类试验组（C 组），每组 16 只 SD 大鼠，单笼饲养，饲养期为 28 d，实验期间 SD 大鼠的饲喂情况及方法见表 1。

表 1　SD 大鼠饲喂情况及方法

Table 1　Feeding status and methods of SD rats

组别 Groups	第 1 阶段 Phase 1 第 1~7 天 Day 1 to 7	第 2 阶段 Phase 2 第 8~28 天 Day 8 to 28
A	奶液 1	奶液 1+饲粮 1
B	奶液 2	奶液 2+饲粮 2
C	奶液 3	奶液 3+饲粮 3

1) 第 2 阶段中奶液和饲粮按 7:3 的比例进行饲喂。The milk and the feed were mixed in the ratio of 7:3 in phase 2.

1.3 样品采集

从试验期第 8 天起，每天上、下午共 2 次，收集每笼 SD 大鼠的新鲜粪便（约 5 g），清理粪便中毛等杂物，混合均匀，加入 0.5 mL 10%硫酸拌匀，置于-20 ℃冰箱保存。连续收集粪样 14 d，将粪样置于 65 ℃烘箱中烘干，粉碎，过 40 目筛，用于测定养分表观消化率。

饲养试验结束后 24 h 空腹过夜，在试验第 29 天早晨称重，摘眼球采血后颈椎脱臼处死，打开腹腔，分离胃、肝脏、脾脏、肾脏、胰腺和小肠，观察是否有病变，同时称量胃（生理盐水清洗内容物）、肝脏、脾脏和肾脏的重量。其中，经 EDTA 抗凝管采集的新鲜血样于室温静止 30 min 后 3 000 r/min 离心 15 min，得血浆，-20 ℃保存，用于测定血浆中游离氨基酸含量；经草酸钾/氟化钠管采集的血样-20 ℃保存，用于测定血液葡萄糖含量；用普通血清管采集的血样静止 30 min，3 000 r/min 离心 15 min，得血清，-20 ℃保存，用于测定血清指标。

1.4 指标检测及方法

1.4.1 生长性能

记录 SD 大鼠每日采食量、初重和末重（第 29 天早晨），计算平均日采食量、平均日增重及料重比。

平均日增重（g/d）=(末重-初重)/28；

平均日采食量（g/d）=总采食量/28；

料重比=总耗料量/总增重。

1.4.2 脏器指数

详细记录 SD 大鼠体重及脏器重量（第 29 天早晨），计算脏器指数，计算公式如下：

脏器指数＝脏器重量（g）/体重（g）。

1.4.3 血液生化指标

采用 RP-HPLC-FMOC-CL 柱前衍生化液相色谱测定血浆中游离氨基酸的含量，具体操作步骤如下。

色谱条件：色谱柱为 Silversil C18 柱，柱内径 5 μm，柱长 4.6 mm×150 mm（Dikma）；

流动相 A，乙腈：水=10:90（体积比，含 0.05%甲酸）；流动相 B，乙腈：水=90:10（体积比）；流速为 1.0 mL/min。梯度程序：0~8 min，流动相 B 24%~35%；8~15 min，流动相 B 35%~40%；15~22 min，流动相 B 40%~48%；22~25 min，流动相 B 48%~64%；25~28 min，流动相 B 64%~82%；28~30 min，流动相 B 82%~82%；30~35 min，流动相 B 82%~24%；38 min，停止。检测波长：激发波长（λex）260 nm，发射波长（λem）305 nm；进样量：20 μL；柱温：37 ℃。

衍生反应：准确吸取 10 μL（10 μmol/L）标准溶液或样品，加入 100 μL 硼酸缓冲液（pH=9.0）、20 μL 9-芴基氯甲酸甲酯（5 mmol/L，丙酮），60 ℃水浴反应 1 h，加 20 μL 1 mol/L 盐酸，离心，进样 20 μL。

样品处理及测定：准确量取样品 100 μL，加 100 μL 甲醇，混匀，室温放置 10 min，15 000 r/min 离心 10 min，取上清液 10 μL 和标准样品一样衍生，以峰面积定量。

血清胰岛素（Ins）和类胰岛素生长因子-Ⅰ（IGF-Ⅰ）含量采用酶联免疫吸附试验(ELISA)法，在 MB-530 多功能酶标分析仪（深圳市汇松科技发展有限公司）上测定，具体操作步骤如下：按操作说明配制标准品、洗液工作液、生物素标记抗体工作液、辣根过氧化物酶标记亲和素工作液，将各种试剂移至室温（18~25 ℃）平衡至少 30 min，备用；分别设定标准孔和待测样本孔，每孔分别加标准品或待测样本 100 μL，轻轻晃动混匀，覆上板贴，置 37 ℃温育 2 h；弃去液体，甩干，不用洗涤；每孔加生物素标记抗体工作液 100 μL，覆上新的板贴，置 37 ℃温育 1 h；弃去孔内液体，甩干，洗板 3 次，每次浸泡 2 min，每孔 200 μL，甩干；每孔加辣根过氧化物酶标记亲和素工作液 100 μL，覆上新的板贴，置 37 ℃温育 1 h；弃去孔内液体，甩干，洗板 5 次，每次浸泡 2 min，每孔 200 μL，甩干；依序每孔加底物溶液 90 μL，37 ℃避光显色 15~30 min；依序每孔加终止液 50 μL，终止反应；在反应终止后 5 min 内用 MB-530 多功能酶标分析仪在 450 nm 波长下依序测量各孔的光密度（OD）值。

血清中总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、总胆红素（T-BIL）、直接胆红素（D-BIL）、尿素氮（UN）、总胆固醇（CHO）、甘油三酯（TG）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量与谷丙转氨酶（ALT）、谷草转氨酶（AST）、肌酸激酶（CK）

活性及血液葡萄糖含量采用 CS-T300 全自动生化分析仪（长春迪瑞实业有限公司）测定，检测试剂盒由长春迪瑞医疗科技股份有限公司提供；血清碱性磷酸酶（AKP）采用微量酶标法测定，检测试剂盒由南京建成生物工程研究所提供，测定方法参照试剂盒说明书。

1.4.4 养分表观消化率

饲粮和粪便中的干物质、粗蛋白质、粗脂肪含量参照《饲料分析与检测》[14]中常规分析与检测方法测定，使用酸不溶灰分（AIA）作为指示剂，AIA 含量参照 GB/T 23743-2009 的方法测定，计算养分表观消化率[15-16]，计算公式如下：

某养分表观消化率（%）=100-（M_{2n}/M_{1n}）×（M_{1m}/M_{2m}）×100。

式中：M_{1m} 为饲粮中 AIA 含量；M_{2m} 为粪便中 AIA 含量；M_{1n} 为饲粮中该养分含量；M_{2n} 为粪便中该养分含量。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 18.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析及 Duncan 氏法进行多重比较，结果以平均值±标准差（mean±SD）的形式表示，$P\leq0.05$ 认为具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠生长性能的影响

由表 2 可知，配方奶粉中无论是添加低聚糖益生元还是多糖益生元对 SD 大鼠的平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著影响（$P>0.05$），但与对照组相比，B 组平均日增重提高了 3.55%，料重比降低了 9.80%，C 组平均日增重提高了 8.33%，料重比降低了 13.06%。

表 2 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠生长性能的影响

Table 2 Effects of prebiotics supplemented in infant formula on growth performance of SD rats

项目 Items	组别 Groups		
	A	B	C
平均日增重 ADG/（g/d）	5.64±0.85	5.84±0.28	6.11±0.77
平均日采食量 ADFI/	18.32±1.51	18.65±0.97	18.63±1.04

（g/d）			
料重比 F/G	2.45±0.32	2.21±0.07	2.13±0.24

同行各组数据无字母或上标字母相同表示无显著差异（P>0.05），不同小写字母表示差异显著（P≤0.05）。下表同。

In the same row, values with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05),with different small letter superscripts mean significant difference (P≤0.05).The same as below.

2.2 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠脏器指数的影响

由表 3 可知，3 组 SD 大鼠的胃、肝脏、脾脏和肾脏指数均无显著差异（P>0.05）。

表 3 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠脏器指数的影响

Table 3 Effects of prebiotics supplemented in infant formula on organ indexes of SD rats

项目 Items	组别 Groups		
	A	B	C
胃 Stomach	0.020 7±0.003 6	0.018 9±0.001 3	0.017 1±0.001 9
肝脏 Liver	0.044 0±0.004 8	0.045 8±0.003 1	0.042 7±0.001 5
脾脏 Spleen	0.004 6±0.003 1	0.003 9±0.002 4	0.002 3±0.000 4
肾脏 Kidney	0.012 1±0.000 7	0.010 7±0.001 3	0.010 5±0.000 8

2.3 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠血液生化指标的影响

由表 4 可知，与对照组相比，B 组 SD 大鼠血清 HDL-C 含量显著提高（P≤0.05），血清 UN 含量显著降低（P≤0.05）；C 组 SD 大鼠血清 Ins、IGF-Ⅰ和 HDL-C 含量显著提高（P≤0.05）。

表 4 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠血清生化指标和血液葡萄糖含量的影响

Table 4 Effects of prebiotics supplemented in infant formula on serum biochemical indices and blood GLU content of SD rats

项目 Items	组别 Groups		
	A	B	C
胰岛素 Ins/（nIU/mL）	15 972.53±4 550.03^{a}	15 847.37±3 831.51^{a}	19 262.05±5 686.57^{b}

类胰岛素样生长因子-Ⅰ IGF-Ⅰ/（ng/mL）	141.46±43.58^{a}	142.03±31.67^{a}	208.85±43.93^{b}
碱性磷酸酶 AKP/（U/L）	529.32±65.50	586.32±114.44	482.12±114.98
葡萄糖 GLU/（mmol/L）	6.12±1.13	7.25±0.57	6.99±1.05
总蛋白 TP/（g/L）	56.33±4.23	56.15±3.08	55.30±2.78
白蛋白 ALB/（g/L）	35.15±2.68	34.90±1.61	33.48±0.74
总胆红素 T-BIL/（μmol/L）	4.06±1.93	2.81±0.92	2.09±0.34
直接胆红素 D-BIL/（μmol/L）	2.51±1.51	1.65±0.90	0.90±0.26
谷丙转氨酶 ALT/（U/L）	82.50±8.35	86.75±11.44	89.00±27.80
谷草转氨酶 AST/（U/L）	265.25±74.03	258.25±17.63	278.75±26.20
尿素氮 UN/（mmol/L）	4.89±2.91^{a}	1.73±0.75^{b}	2.63±0.83^{ab}
总胆固醇 CHO/（mmol/L）	3.23±2.03	2.58±0.44	2.38±0.30
甘油三酯 TG/（mmol/L）	0.89±0.18	0.59±0.38	0.50±0.21
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/（mmol/L）	0.90±0.49^{a}	1.64±0.17^{b}	1.51±0.21^{b}
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/（mmol/L）	0.70±0.19	0.75±0.19	0.63±0.13
肌酸激酶 CK/（U/L）	224 4.00±467.46	171 0.00±232.77	166 4.00±465.59

由表 5 可知，与对照组相比，B 组 SD 大鼠血浆非必需氨基酸中精氨酸（Arg）、丝氨酸（Ser）和丙氨酸（Ala）含量均显著提高（$P \leq 0.05$），C 组 SD 大鼠血浆非必需氨基酸中 Arg、Ser、甘氨酸（Gly）、Ala 和酪氨酸（Tyr）含量均显著提高（$P \leq 0.05$）；B 组和 C 组血浆中赖氨酸（Lys）、色氨酸（Trp）、苏氨酸（Thr）、蛋氨酸（Met）、缬氨酸（Val）、苯丙氨酸（Phe）、亮氨酸（Leu）等必需氨基酸含量均有不同程度的提高，但差异均不显著（$P>0.05$）。

表 5 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠血浆中游离氨基酸含量的影响

Table 5 Effects of prebiotics supplemented in infant formula on free amino acid contents in

159 plasma of SD rats μmol/L

项目 Items	组别 Groups A	B	C
赖氨酸 Lys	183.20±81.89	223.17±92.97	284.90±57.45
色氨酸 Trp	206.30±78.65	248.16±81.91	302.67±64.05
苏氨酸 Thr	141.27±36.78	179.21±40.61	207.16±59.32
蛋氨酸 Met	26.35±9.69	36.08±5.65	40.56±8.28
缬氨酸 Val	103.47±31.25	127.62±5.47	137.08±39.60
苯丙氨酸 Phe	27.45±13.32	37.68±14.75	42.50±16.08
亮氨酸 Leu	55.82±16.09	61.37±7.07	73.50±20.29
异亮氨酸 Ile	212.17±70.17	189.64±25.89	203.70±60.04
组氨酸 His	231.60±86.09	195.86±36.63	188.72±92.18
天冬酰胺 Asn	187.50±89.17	133.19±84.53	183.85±130.82
精氨酸 Arg	73.50±12.44[a]	238.15±71.31[b]	213.80±49.92[b]
牛磺酸 Tau	1007.29±502.08	1596.84±846.75	1919.31±671.88
谷氨酰胺 Gln	392.24±108.34	397.81±80.28	436.47±176.92
鸟氨酸 Orn	1567.19±281.69	1788.38±416.46	1819.24±677.58
丝氨酸 Ser	159.00±32.89[a]	233.51±44.26[b]	289.29±73.42[b]
天冬氨酸 Asp	18.43±15.95	23.34±9.38	30.15±23.82
谷氨酸 Glu	128.17±40.32	146.32±19.11	185.26±26.65
甘氨酸 Gly	214.05±29.89[a]	240.73±35.19[a]	319.22±47.55[b]
丙氨酸 Ala	434.21±65.71[a]	817.06±36.73[b]	892.99±122.26[b]
酪氨酸 Tyr	171.41±42.99[a]	249.14±26.25[a]	283.59±53.94[b]
脯氨酸 Pro	448.39±67.53	533.79±112.30	538.37±161.44
半胱氨酸 Cys	392.42±107.05	368.28±142.99	313.11±69.36

2.4 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠养分表观消化率的影响

由表 6 可知，与对照组相比，B 组粗蛋白质和粗脂肪表观消化率分别提高了 2.42%和 5.57%，无差异显著（P>0.05）；C 组粗蛋白质和粗脂肪表观消化率分别提高了 7.39%和 8.20%，差异显著（P≤0.05）。

表 6 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠养分表观消化率的影响

Table 6 Effects of prebiotics supplemented in infant formula on nutrient apparent digestibility of SD rats %

项目 Items	组别 Groups		
	A	B	C
粗蛋白 CP	74.36±3.07^{a}	76.21±1.73^{a}	79.88±3.02^{b}
粗脂肪 EE	64.62±3.33^{a}	68.24±3.42^{a}	69.93±2.21^{b}
干物质 DM	85.33±0.54	85.94±0.61	85.95±0.57

3 讨 论

3.1 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠生长性能和脏器指数的影响

配方奶粉中添加益生元对幼龄动物生长性能影响的试验结果不尽相同。Costalos 等[17]研究表明富含果寡糖和低聚半乳糖的配方奶粉对婴儿 6~12 周的生长速度无显著影响；Ashley 等[18]用 419 个婴儿进行了为期 120 d 的试验，结果发现在配方奶粉中添加益生元对婴儿 14~120 日龄的生长速度没有显著影响；黄小流等[19]研究表明，饲粮中添加低聚果糖对断奶 SD 大鼠的料重比没有显著影响；杭苏琴等[20]研究发现，饲粮中添加甘露寡糖对仔猪断奶第 1 周的生长性能无显著影响，而对其断奶第 2 周以后的生长性能有显著影响。相反，有研究发现，配方奶粉中添加益生元可以增加婴儿体重，但不会影响其身高和大脑发育[21-22]。不同研究结果存在差异的原因可能与益生元种类与用量、饲粮组成及动物种类、生理状态和试验饲养环境等因素有关。本试验中，在配方奶粉中添加益生元可以从一定程度上提高 SD 大鼠的平均日增重和平均日采食量，降低料重比，但这种影响不显著，可能与试验重复之间数据变异较大、试验周期中换料频率及 SD 大鼠生理状况的改变等有关，这与一些研究结果相

一致。

健康的动物其脏器指数均在正常范围之内，内脏过大或过小均是其可能发生病变的征兆[23]。本试验中 3 组 SD 大鼠胃、肝脏、脾脏和肾脏指数均无显著差异，且均在正常生理状态的标准范围[24-25]之内，说明各配方奶粉没有改变 SD 大鼠的脏器结构和功能。

3.2 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠血液生化指标的影响

益生元有降低血脂、调节脂肪代谢等作用，但具体机制目前尚不清楚[6]。血清中 Ins 和 IGF-Ⅰ含量反映了动物机体三大营养物质代谢情况，但二者的代谢机制和途径不同，且作用也不尽相同，Ins 可能主要在蛋白质分解代谢中起抑制作用，而 IGF-Ⅰ可能主要在蛋白质合成代谢中起促进作用[26]。研究表明，高蛋白质水平的配方奶粉可以通过提高血浆和组织中促进 Ins 生成的相关氨基酸[如 Leu、异亮氨酸（Ile）、Arg、Ala 和 Phe 等[27]]的含量，进而刺激 Ins 和 IGF-Ⅰ的分泌，促进动物机体脂肪沉积和体重增长，但也可能引起肥胖症[28]。Yang 等[29]认为其他氨基酸调控 Ins 分泌主要通过以下途径：1）急性反应，如提高谷氨酸脱氢酶活性；2）慢性反应，如基因转录和调控β细胞新陈代谢。Hogg 等[30]研究发现，在胎鼠胰岛中，氨基酸刺激 IGF-Ⅰ的作用比葡萄糖更强烈；在动物早期生长中，氨基酸还可以通过调控合成代谢途径和脂肪沉积显著影响 Ins 分泌[31-32]。本试验中，与对照组相比，在配方奶粉中添加低聚糖类益生元显著提高 SD 大鼠血清中 HDL-C 的含量，并显著提高了血清中 Arg、Ser 和 Ala 的含量；在配方奶粉中添加多糖类益生元显著提高 SD 大鼠血清中 Ins、IGF-Ⅰ和 HDL-C 发含量，显著提高血清中 Arg、Ser、Gly、Ala 和 Tyr 的含量。同时，本试验中，在配方奶粉中添加低聚糖类益生元显著降低了 SD 大鼠血清中 UN 的含量。这与前人研究的结果相一致，益生元调控血清中营养物质代谢的可能原因有：1）低聚糖和部分聚葡萄糖可以促进动物肠道内双歧杆菌增殖，而双歧杆菌通过影响胆固醇合成酶系中β-羟基-β-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶的活性来介导脂肪代谢[33]；2）机体对蛋白质利用率增加，同时血浆中一些与 Ins 和 IGF-Ⅰ生成相关的氨基酸的含量升高，刺激 Ins 和 IGF-Ⅰ分泌，进而加快机体脂肪沉积。

益生元同时可以降低癌症和心血管疾病等的发病率，有研究表明，高密度脂蛋白可以通

过调控 ATP 结合蛋白 A1 和 ATP 结合蛋白 G1 参与反向转运胆固醇，降低巨噬细胞胆固醇含量，同时高密度脂蛋白还具有抗炎、抗氧化等维持机体健康的重要功能[34]，高密度脂蛋白代谢和血清 TG 含量相关，血清 TG 含量越高，高密度脂蛋白越容易降解[35]，本试验结果与此基本一致。益生元可能通过调控血清中 CK 活性来调控血压，研究发现，CK 降低血压的可能途径如下：1）降低改变收缩蛋白局部 ATP 水平及肌球蛋白 ATP 酶活性；2）促进一氧化氮的生成；3）降低肾性水钠潴留能力[36-37]。

3.3 配方奶粉中添加益生元对 SD 大鼠养分表观消化率的影响

养分表观消化率的测定可以比较直观地反映饲粮的可消化性及动物的消化能力[38]。本试验结果显示，与对照组相比，在配方奶粉中添加多糖类益生元可以显著提高 SD 大鼠粗蛋白质和粗脂肪的表观消化率；在配方奶粉中添加低聚糖类益生元可以提高 SD 大鼠粗蛋白质和粗脂肪的消化率，但差异未达到显著水平。Kawasaki 等[39]研究表明，在饲粮中添加低聚果糖对豚鼠氮的养分表观消化率无显著影响，但对氮的沉积有显著提高；陆翔等[40]研究表明，在配方奶粉中添加低聚果糖和低聚半乳糖可以提高 SD 大鼠蛋白质利用率；Martinelli 等[41]研究发现，在布丁中添加一定量的乳清蛋白和聚葡萄糖可以降低健康成年人的食欲和饥饿感；Ibarra 等[42]研究发现，在早餐饮食中加入聚葡萄糖可以降低 Ins 的分泌，而在中餐饮食中添加聚葡萄糖可以降低饥饿感，可能原因是聚葡萄糖提高了机体对养分的消化利用率；同时，权美平等[43]报道膳食纤维可以促进肠道消化吸收。上述试验结果与本试验结果基本一致。益生元可能通过促进肠道益生菌增殖来提高机体对养分的消化率，因益生菌可以分泌一种动物机体自身不能分泌的半乳糖苷酶，半乳糖苷酶可以提高粗蛋白质、粗脂肪和多糖等养分的消化吸收效率[44]。

4 结　论

本试验条件下，在配方奶粉中添加低聚糖益生元或多糖益生元均可以改善 SD 大鼠的血液生化指标，提高其养分表观消化率，从而在一定程度上促进 SD 大鼠的生长，且以添加多糖类益生元的效果更佳。

参考文献：

[1] HSIEH C C,HERNÁNDEZ-LEDESMA B,FERNÁNDEZ-TOMÉ S,et al.Milk proteins,peptides,and oligosaccharides:effects against the 21st century disorders[J].Biomed Research International,2015,2015:146840.

[2] KUNZ C,RUDLOFF S,BAIER W,et al.Oligosaccharides in human milk:structural,functional,and metabolic aspects[J].Annual Review of Nutrition,2000,20:699–722.

[3] VANDENPLAS Y,DE GREEF E,VEEREMAN G.Prebiotics in infant formula[J].Gut Microbes,2014,5(6):681–687.

[4] 庞明利.益生元在奶粉中的应用[C]//第十三届中国国际食品添加剂和配料展览会论文集.上海:中国食品添加剂和配料协会,中国贸促会轻工行业分会,2009:178–182.

[5] 何君,韩育梅,刘敏,等.益生元在发酵乳中的应用研究进展[J].食品工业科技,2017,38(8):379–383.

[6] AL-SHERAJI S H,ISMAIL A,MANAP M Y,et al.Prebiotics as functional foods:a review[J].Journal of Functional Foods,2013,5(4):1542–1553.

[7] SANGWAN V,TOMAR S K,SINGH R R B,et al.Galactooligosaccharides:novel components of designer foods[J].Journal of Food Science,2011,76(4):R103–R111.

[8] FANARO S,MARTEN B,BAGNA R,et al.Galacto-oligosaccharides are bifidogenic and safe at weaning:a double-blind randomized multicenter study[J].Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition,2009,48(1):82–88.

[9] MCVEY NEUFELD K A,O'MAHONY S M,HOBAN A E,et al.Neurobehavioural effects of *Lactobacillus rhamnosus* GG alone and in combination with prebiotics polydextrose and galactooligosaccharide in male rats exposed to early-life stress[J].Nutritional Neuroscience,2017,27:1–10.

[10] DO CARMO M M R,WALKER J C L,NOVELLO D,et al.Polydextrose:physiological function,and effects on health[J].Nutrients,2016,8(9):553.

[11] BRAEGGER C,CHMIELEWSKA A,DECSI T,et al.Supplementation of infant formula with probiotics and/or prebiotics:a systematic review and comment by the ESPGHAN committee on nutrition[J].Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition,2011,52(2):238–250.

[12] SKÓRKA A,PIEŚCIK-LECH M,KOŁODZIEJ M,et al.To add or not to add probiotics to infant formulae?An updated systematic review[J].Beneficial Microbes,2017,8(5):717–725.

[13] SKÓRKA A,PIEŚCIK-LECH M,KOŁODZIEJ M,et al.Infant formulae supplemented with prebiotics:are they better than unsupplemented formulae?An updated systematic review[J].British Journal of Nutrition,2018,119(7):810–825.

[14] 贺建华.饲料分析与检测[M].北京:中国农业出版社,2011:18–70.

[15] KAVANAGH S,LYNCH P B,O'MARA F,et al.A comparison of total collection and marker technique for the measurement of apparent digestibility of diets for growing pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2001,89(1/2):49-58.

[16] 胡琳,王定发,李韦,等.日粮中添加不同比例木薯茎叶对海南黑山羊生长性能、血清生化指标和养分表观消化率的影响[J].中国畜牧兽医,2016,43(12):3193–3199.

[17] COSTALOS C,KAPIKI A,APOSTOLOU M,et al.The effect of a prebiotic supplemented formula on growth and stool microbiology of term infants[J].Early Human Development,2008,84(1):45–49.

[18] ASHLEY C,JOHNSTON W H,HARRIS C L,et al.Growth and tolerance of infants fed formula supplemented with polydextrose (PDX) and/or galactooligosaccharides (GOS):double-blind,randomized,controlled trial[J].Nutrition Journal,2012,11:38.

[19] 黄小流,肖凤,王剑,等.低聚乳果糖粗品对断奶大鼠生长性能及血清生化指标的影响[J].食品工业科技,2013,34(13):321–324,329.

[20] 杭苏琴,黄瑞华,朱伟云.甘露寡糖对断奶仔猪生产性能和血液生化指标的影响[J].中国兽医学报,2009,29(2):220–223.

[21] MUGAMBI M N,MUSEKIWA A,LOMBARD M,et al.Synbiotics,probiotics or prebiotics

in infant formula for full term infants:a systematic review[J].Nutrition Journal,2012,11:81.

[22] HOLSCHER H D,FAUST K L,CZERKIES L A,et al.Effects of prebiotic-containing infant formula on gastrointestinal tolerance and fecal microbiota in a randomized controlled trial[J].Journal of Parenteral and Enteral Nutrition,2012,36(Suppl.1):95S-105S.

[23] 柳云恩,姚宝玉,杨冬华,等.不同周龄 SD 大鼠脏器重量及其变化趋势分析[J].中国比较医学杂志,2012,22(1):22－27.

[24] 田永路,于洪江,张希牧,等.5～7 周龄 SD 和 Wistar 大鼠主要脏器系数及体尺的测定[J].实验动物科学,2009,26(6):21－25,29.

[25] 樊林花,李丹,樊平花,等.清洁级 SD 大鼠体重和主要脏器系数正常参考值研究及相关性分析[J].中国卫生检验杂志,2012,22(4):750-752.

[26] 罗钧秋.猪饲粮不同来源蛋白质营养代谢效应的比较研究[D].博士学位论文.雅安:四川农业大学,2011.

[27] NEWSHOLME P,BRENNAN L,RUBI B,et al.New insights into amino acid metabolism, β-cell function and diabetes[J].Clinical Science,2005,108(3):185–194.

[28] KOLETZKO B,SYMONDS M E,OLSEN S F,et al.Programming research:where are we and where do we go from here?[J].The American Journal of Clinical Nutrition,2011,94(Suppl.6):2036S-2043S.

[29] YANG J C,CHI Y J,BURKHARDT B R,et al.Leucine metabolism in regulation of insulin secretion from pancreatic beta cells[J].Nutrition Reviews,2010,68(5):270–279.

[30] HOGG J,HAN V K M,CLEMMONS D R,et al.Interactions of nutrients,insulin-like growth factors (IGFs) and IGF-binding proteins in the regulation of DNA synthesis by isolated fetal rat islets of Langerhans[J].Journal of Endocrinology,1993,138(3):401–412.

[31] NEWSHOLME P,GAUDEL C,MCCLENAGHAN N H.Nutrient regulation of insulin secretion and β-cell functional integrity[M]//ISLAM S.The Islets of Langerhans.Dordrecht:Springer,2010:91–114.

[32] MUNTONI S,MUNTONI S.Insulin resistance:pathophysiology and rationale for treatment[J].Annals of Nutrition & Metabolism,2011,58(1):25–36.

[33] 庞明利,杨海军.水溶性膳食纤维聚葡萄糖的功能研究与应用现状[J].食品安全导刊,2011(9):53–56.

[34] ROSENSON R S,BREWER B H,Jr.,ANSELL B J,et al.Dysfunctional HDL and atherosclerotic cardiovascular disease[J].Nature Reviews Cardiology,2015,13(1):48–60.

[35] 张诗岚,杜晓,刘玲.高密度脂蛋白胆固醇水平与高密度脂蛋白功能:孰是孰非?[J].中国动脉硬化杂志,2017,25(1):90－94.

[36] BREWSTER L M,MAIRUHU G,BINDRABAN N R,et al.Creatine kinase activity is associated with blood pressure[J].Circulation,2006,114(19):2034–2039.

[37] BREWSTER L M,SEEDAT Y K.Why do hypertensive patients of African ancestry respond better to calciumblockers and diuretics than to ACE inhibitors and β-adrenergic blockers?Asystematic review[J].BMC Medicine,2013,11:141.

[38] 秦红,蔡传江,赵燕,等.酿酒酵母和芽孢杆菌对育肥猪养分表观消化率、肠道形态结构和肠道免疫的影响[J].动物营养学报,2017,29(12):4459-4468.

[39] KAWASAKI K,MIN X,NISHIYAMA A,et al.Effect of fructo-oligosaccharide on nitrogen utilization in guinea pigs[J].Animal Science Journal,2013,84(4):328–333.

[40] 陆翔,李静,王强,等.模拟中国母乳配制的婴儿配方奶粉对幼龄动物生长影响的实验研究[J].食品工业科技,2010,31(10):352-355.

[41] MARTINELLI M,WALZ F,GOÑI E,et al.Effects of puddings containing whey protein and polydextrose on subjective feelings of appetite and short-term energy intake in healthy adults[J].International Journal of Food Sciences and Nutrition,2017,68(6):733–741.

[42] IBARRA A,OLLI K,PASMAN W,et al.Effects of polydextrose with breakfast or with a midmorning preload on food intake and other appetite-related parameters in healthy normal-weight and overweight females:an

acute,randomized,double-blind,placebo-controlled,and crossover study[J].Appetite,2017,110:15–24.

[43] 权美平,侯云云.膳食纤维的生理保健功能及其提取工艺的研究进展[J].保鲜与加工,2013,13(1):49－51.

[44] 陈玉龙.低聚异麦芽糖和复合益生菌制剂对繁殖母猪生产性能的影响[D].硕士学位论文.南宁:广西大学,2016.

Effects of Prebiotics Supplemented in Infant Formula on Growth Performance, Blood Biochemical Indices and Nutrient Apparent Digestibility of SD Rats

ZHOU Shuiyue[1] HANG Yuanxin[2] ZHANG Yanchun[3] DAI Zhiyong[3] PAN Lina[3] WANG Jianwu[2*] FANG Rejun[1*]

（1. *College of Animal Science and Technology*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*; 2. *Xiangya School of Public Health*, *Central South University*, *Changsha* 410128, *China*; 3. *Ausnutria Dairy Co., Ltd.,* (*China*), *Changsha* 410005, *China*）

Abstract: This experiment was to identify the effects of prebiotics supplemented in infant formula on growth performance, blood biochemical indices and nutrient apparent digestibility of SD rats. Forty-eight healthy SD rats, 15 days old (a week before weaning) with similar body weight, were randomly divided into 3 groups: groups A (control group), B and C, with 16 rats per group. Rats in group A were fed common infant formula, those in group B were fed infant formula supplemented oligosaccharide prebiotic, and those in group C were fed infant formula supplemented polysaccharide prebiotic. The feeding test was carried for 28 days. The results showed as follows: 1) compared with control group, the average daily gain (ADG) in groups B and C was increased by 3.55% and 8.33%, and the F/G was decreased by 9.80% and 13.06%, respectively, but the differences were not significant (P>0.05). 2) Compared with control group, the high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) content in serum in group B was significantly increased (P≤0.05),

*Corresponding authors: WANG Jianwu, associate professor, E-mail： jianwu_wang@csu.edu.cn; FANG Rejun, professor, E-mail:fangrj63@126.com
（责任编辑 菅景颖）

the urea nitrogen （UN） content in serum in group B was significantly decreased ($P\leq0.05$); the insulin (Ins), insulin-like growth factor-Ⅰ（IGF-Ⅰ） and HDL-C content in serum were significantly increased in group C ($P\leq0.05$). 3) Compared with control group, the non-essential amino acids such as arginine (Arg), serine (Ser) and alanine (Ala) contents in serum were significantly increased in group B ($P\leq0.05$); the non-essential amino acids such as Arg, Ser, glycine (Gly), tyrosine (Tyr) and Ala contents in serum were significantly increased in group C ($P\leq0.05$). 4) Compared with control group, the apparent digestibility of crude protein (CP) and ether extract (EE) were increased by 2.42% and 5.57% in group B, respectively, but the differences were not significant ($P>0.05$); the apparent digestibility of CP and EE were increased by 7.39% and 8.20% in group C, respectively, and the differences were significant ($P\leq0.05$). In conclusion, these results indicate that the supplemented oligosaccharide prebiotic or polysaccharide prebiotic in infant formula can improve the blood biochemical indices and nutrient apparent digestibility of SD rats, thus promote the growth of SD rats to some extent. The effect of polysaccharide prebiotic is better than that of oligosaccharide prebiotic.

Key words: infant formula; prebiotics; growth performance; blood biochemical indices; nutrient apparent digestibility